

# **Informe sobre la estabilidad de la bóveda de la cripta de la Catedral de Palma de Mallorca, con vistas a la retirada del actual apeo**

por:

**Santiago Huerta Fernández**

DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

con la colaboración de:

**Fabián López Ulloa**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

y

**Rosa Ana Guerra Pestonit**

UNIVERSIDAD DE A CORUÑA

## Índice

1. Introducción: Objetivo del informe .....	1
2. Marco teórico: enfoque del equilibrio de Heyman .....	2
2.1 El material: hipótesis del análisis límite .....	2
2.2 Condición de estabilidad; seguridad .....	2
2.3 Teorema Fundamental; límite inferior del coeficiente de seguridad .....	3
2.4 Movimientos y grietas .....	3
3. Bóveda .....	4
3. 1 Geometría .....	5
3.2 Levantamiento .....	7
4. Análisis estructural .....	10
4.1 Análisis de bóvedas de arista .....	10
4.2 Análisis de la bóveda de la cripta .....	12
4.4 Origen de los agrietamientos y daños .....	18
5. Conclusiones .....	22
6. Bibliografía .....	23
7. Láminas .....	24

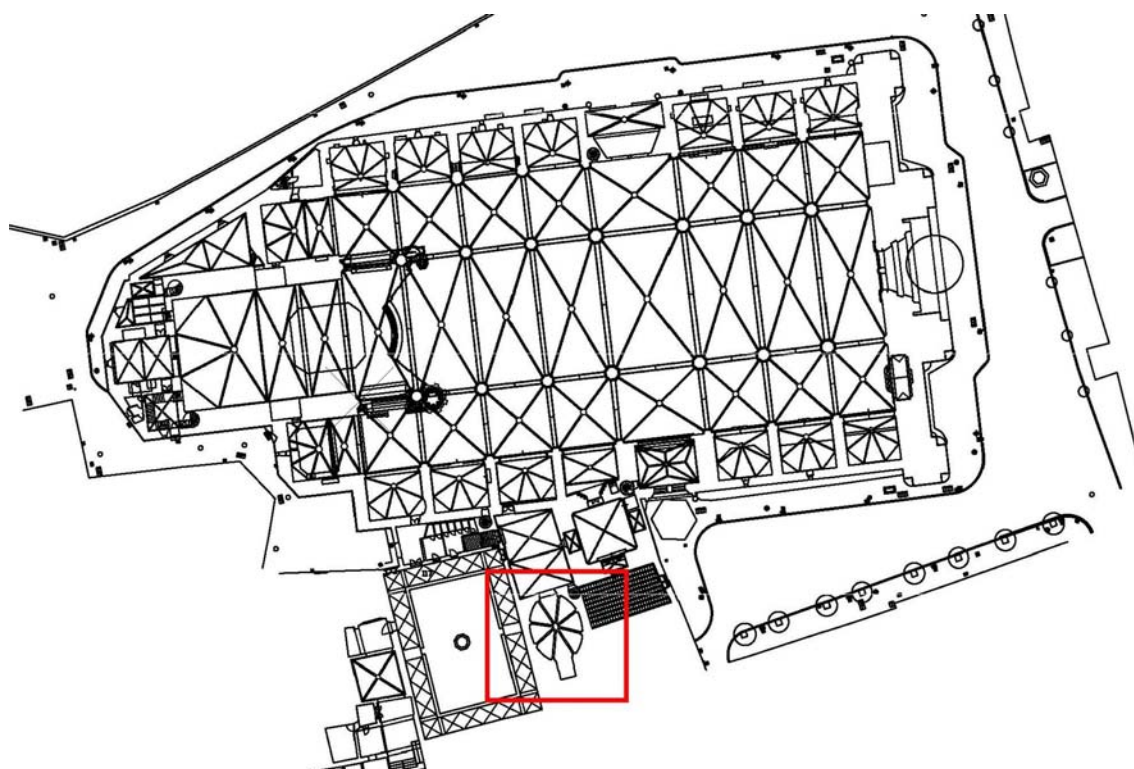
## 1. Introducción: Objetivo del informe

La cripta situada bajo la sala capitular de la catedral de Mallorca, Figura 1, ha estado apeada durante varios decenios (quizá desde los años 1950 o 1960). Se trata de una bóveda de arista rebajada. Posibles razones para el apeo son los desconchones y daños que se observan en la parte baja de las aristas, las grietas en la zona cercana a la clave y un visible descenso del suelo superior en la zona central.

El objetivo del presente informe es estudiar la posible retirada del apeo, que afea y entorpece el espacio de la cripta.

Tras varias visitas de inspección y unos cálculos previos, resultó evidente que ni los daños ni el descenso del suelo afectan a la seguridad de la bóveda y se procedió a la retirada del apeo.

En lo que sigue se exponen detalladamente los cálculos y se da una explicación del posible origen de los daños que, como se ha dicho, no afectan a la seguridad de la bóveda.



**Figura 1.** Planta de la catedral de Mallorca. En un recuadro, la sala capitular (E. Taltavull)

## **2. Marco teórico: enfoque del equilibrio de Heyman**

Para contestar a las preguntas planteadas en el presente informe, es preciso utilizar la teoría de estructuras. La teoría convencional de estructuras (desarrollada para estructuras porticadas de acero u hormigón armado) no es de aplicación a las estructuras históricas de fábrica. Al realizar los estudios se ha aplicado la teoría del Análisis Límite de Estructuras de Fábrica, tal y como la ha desarrollado fundamentalmente Heyman en los últimos años —véase Heyman (1995, 1999 y 2011). En este apartado se resumirán los principios e ideas fundamentales.

### **2.1 El material: hipótesis del análisis límite**

Se considera la estructura de fábrica formada por un material rígido-unilateral, que resiste compresiones pero no resiste tracciones. Es decir, imaginamos la fábrica como un conjunto de bloques indeformables en contacto seco y directo que se sostienen por su propio peso. Supondremos también que las tensiones son bajas, no habiendo peligro de fallo por resistencia, y que el rozamiento entre las piedras es suficientemente alto como para impedir su deslizamiento. Estas tres hipótesis dan lugar a los Principios del Análisis Límite de las Fábricas:

- (1) la fábrica presenta una resistencia a compresión infinita;
- (2) la fábrica tiene una resistencia a tracción nula;
- (3) el fallo por deslizamiento es imposible.

La hipótesis (1) va ligeramente en contra de seguridad y se comprobará mediante un cálculo numérico. La suposición (2) va, evidentemente, a favor de seguridad. Finalmente, la hipótesis (3), vuelve a estar en contra de seguridad, pero los casos de deslizamiento entre piedras son extremadamente raros (suelen estar asociados a movimientos sísmicos).

### **2.2 Condición de estabilidad; seguridad**

La condición de estabilidad de una fábrica construida con un material que cumpla los principios anteriores exige que las trayectorias de las fuerzas, las «línea de empujes», esté contenida dentro de la estructura; esto es, para cada sección hipotética de la estructura la resultante de las fuerzas debe estar contenida en su interior.

La seguridad está determinada, en cada sección, por la distancia relativa de la resultante de tensiones (empuje) a sus bordes. El coeficiente de seguridad es geométrico y definirá la posición que dicho empuje no debe sobrepasar dentro de cada sección. Los coeficientes de seguridad dependen del tipo y uso de la estructura, y tienen un carácter empírico. En particular, para el caso de edificios, son distintos para arcos y bóvedas y para estribos; el coeficiente de éstos últimos es mucho más restrictivo, por los motivos que se discutirán en el apartado dedicado a la seguridad del sistema de contrarresto.



### 2.3 Teorema Fundamental; límite inferior del coeficiente de seguridad

Si la estructura es hiperestática, como es habitual, será posible encontrar infinitas líneas de empujes contenidas dentro de la fábrica, que corresponden a las infinitas situaciones de equilibrio posibles (la línea de empujes no es más que una representación gráfica de las ecuaciones de equilibrio) que respetan la propiedad esencial del material (debe trabajar a compresión).

Si se cumplen los principios del análisis límite enunciados antes se puede demostrar —véase Heyman (1995, 1999, 2011)— el siguiente Teorema Fundamental del Análisis Límite (Teorema de la Seguridad o del Límite Inferior):

*Dada una estructura, si es posible encontrar una situación de equilibrio compatible con las cargas que no viole la condición de límite del material (esto es, que no aparezcan tracciones) la estructura no colapsará. Aplicado a las fábricas: si es posible dibujar una línea de empujes contenida dentro de la estructura la estructura no se hundirá.*

La potencia del Teorema radica en que la línea de empujes, es decir, la situación de equilibrio, puede ser elegida libremente. Elegida una línea, podremos aplicar las condiciones de seguridad a cada una de las secciones que atraviesa y obtener, de esta forma, un límite inferior para el coeficiente de seguridad geométrico: sabemos que la estructura tiene al menos ese coeficiente de seguridad (en general, sería posible encontrar una línea de empujes que diera una situación más favorable).

El problema de la seguridad de las fábricas es, pues, un problema de estabilidad. De los tres criterios fundamentales que debe cumplir una estructura (resistencia, rigidez y estabilidad), es éste último el que gobierna el proyecto de las fábricas: las tensiones son bajas y las deformaciones pequeñas. El criterio de estabilidad conduce a una visión de las estructuras de fábrica basada firmemente en la geometría: es la forma la que posibilita que las trayectorias de esfuerzos estén siempre dentro de los límites de la fábrica (para una exposición clara y muy detallada de este enfoque, véase Heyman, 1999 y op.cit.; Huerta 2001).

### 2.4 Movimientos y grietas

Las grietas son algo natural en un material que no resiste tracciones. De hecho, los agrietamientos son la única forma de adaptarse a pequeñas variaciones en las condiciones de contorno (por ejemplo, a un pequeño desplazamiento de los estribos, etc.). Las grietas dividen la estructura en un conjunto «articulado» de bloques que se mueve y adapta a las nuevas condiciones de contorno. A cada movimiento corresponde un agrietamiento distinto y una estructura puede presentar a lo largo de su historia distintos agrietamientos, que corresponden a distintas posiciones de las líneas de empujes (distintas soluciones de las ecuaciones de equilibrio). Sin embargo, el Teorema Fundamental nos asegura que, si encontramos «un

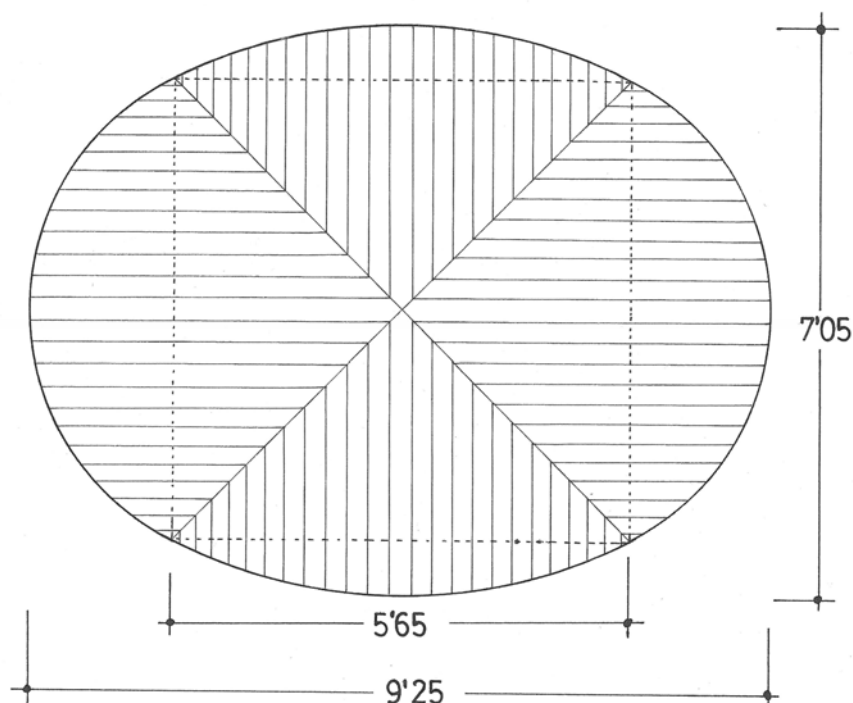
sistema de líneas de empujes» (esto es una cierta situación de equilibrio) dentro de la fábrica, aunque pueden moverse bruscamente, éstas nunca se saldrán de los límites de la fábrica con lo que la estabilidad está asegurada.

### 3. Bóveda

Para el estudio de la bóveda nos hemos basado en el levantamiento realizado por la empresa Mitra Restaura s.l., así como las catas realizadas por Trycsa.

La bóveda está construida en marés y tiene un espesor de 20 cm. Como es habitual, en la zona de los senos hay un relleno estructural de buena mampostería que alcanza unos 3/4 de la altura de la bóveda.

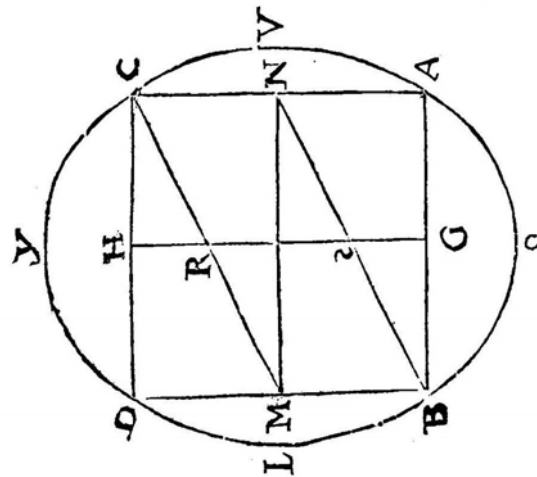
La planta de la bóveda se corresponde con la planta de la sala capítular. Se trata de una planta oval de unos  $9 \times 7$  m<sup>2</sup>. La solución adoptada para cubrir este espacio es extraordinariamente ingeniosa: en el centro se dispone una bóveda de arista cuadrada inscrita en el óvalo (lado unos 5,70 m) y los dos cañones se prolongan hasta cubrir todo el espacio. Así, las plantillas de la labra son las mismas para toda la bóveda. En la Figura 2 se ha dibujado la planta (regularizada como se verá más adelante), con las cotas de la medición y las hiladas dibujadas.



**Figura 2.** Planta de la cripta: cotas e hiladas

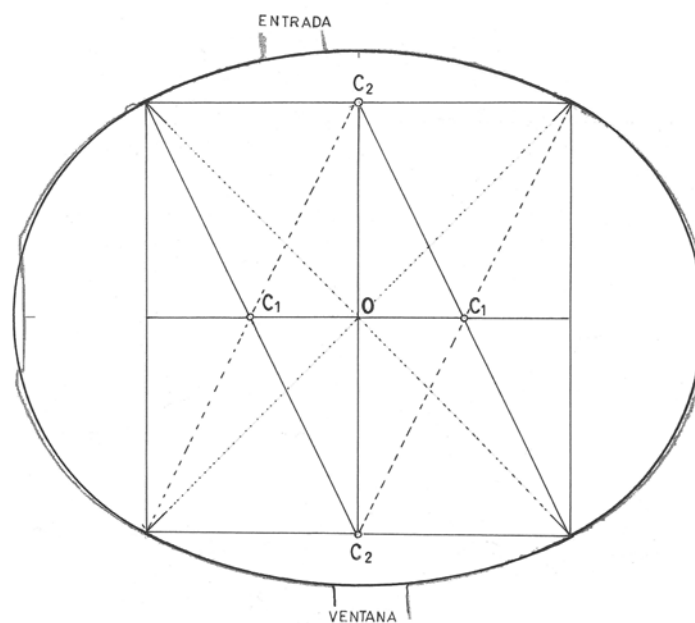
### 3. 1 Geometría

En el proyecto de óvalos se usaron desde el Renacimiento una serie de trazas típicas que, bien conducían a proporciones simples, bien facilitaban la traza. En el caso de la cripta, la traza utilizada aparece en el tratado de Fray Lorenzo de San Nicolás (1639), Figura 3.



**Figura 3.** Trazado de un óvalo según Fray Lorenzo de San Nicolás (1639)

Como puede verse, el cuadrado base es precisamente, la planta de la bóveda de arista de la cripta. En la Figura 4 se ha superpuesto la traza teórica del óvalo de Fray Lorenzo con el levantamiento realizado por Mitra. Puede verse que la coincidencia es casi perfecta (nótese que las coincidencias perfectas no existen en edificios reales).



**Figura 4.** Superposición del óvalo de Fray Lorenzo con la planta medida

Para estudiar la forma de los cañones y de la arista es preciso contrastar las mediciones con alguna hipótesis sobre el posible método de proyecto.

Tomaremos como geometría de la planta la que se deriva del óvalo; la ligera desviación en sentido longitudinal puede muy bien atribuirse al proceso de replanteo.

Sin embargo, es llamativo que la parte central ha permanecido sin deformarse (o se ha deformado de forma completamente simétrica, lo que resulta muy improbable): los lados del cuadrado y las diagonales son iguales.

El siguiente parámetro fundamental es la altura de la clave respecto a los arranques. La línea de clave de la bóveda real presenta un descenso en el centro de unos 10 cm, y la flecha es de, aproximadamente, 1 metro. La flecha original sería, pues, de unos 1,10 m.

Si tomamos como origen la cercha de la diagonal (8 m), ésta será un arco de circunferencia. Tras algunos tanteos, resulta que un arco de radio igual a la arista conduce a una flecha de 1,08 m, muy parecida a la medida. Así, pues, consideraremos que esto es cierto.

Ahora, se puede tantear la forma de los dos cañones transversales. Conocida la luz y la flecha, es muy sencillo calcular el radio de curvatura. Si llamamos  $a$  a la semiluz y  $f$  a la flecha, el radio de curvatura  $R_c$  viene dado por:

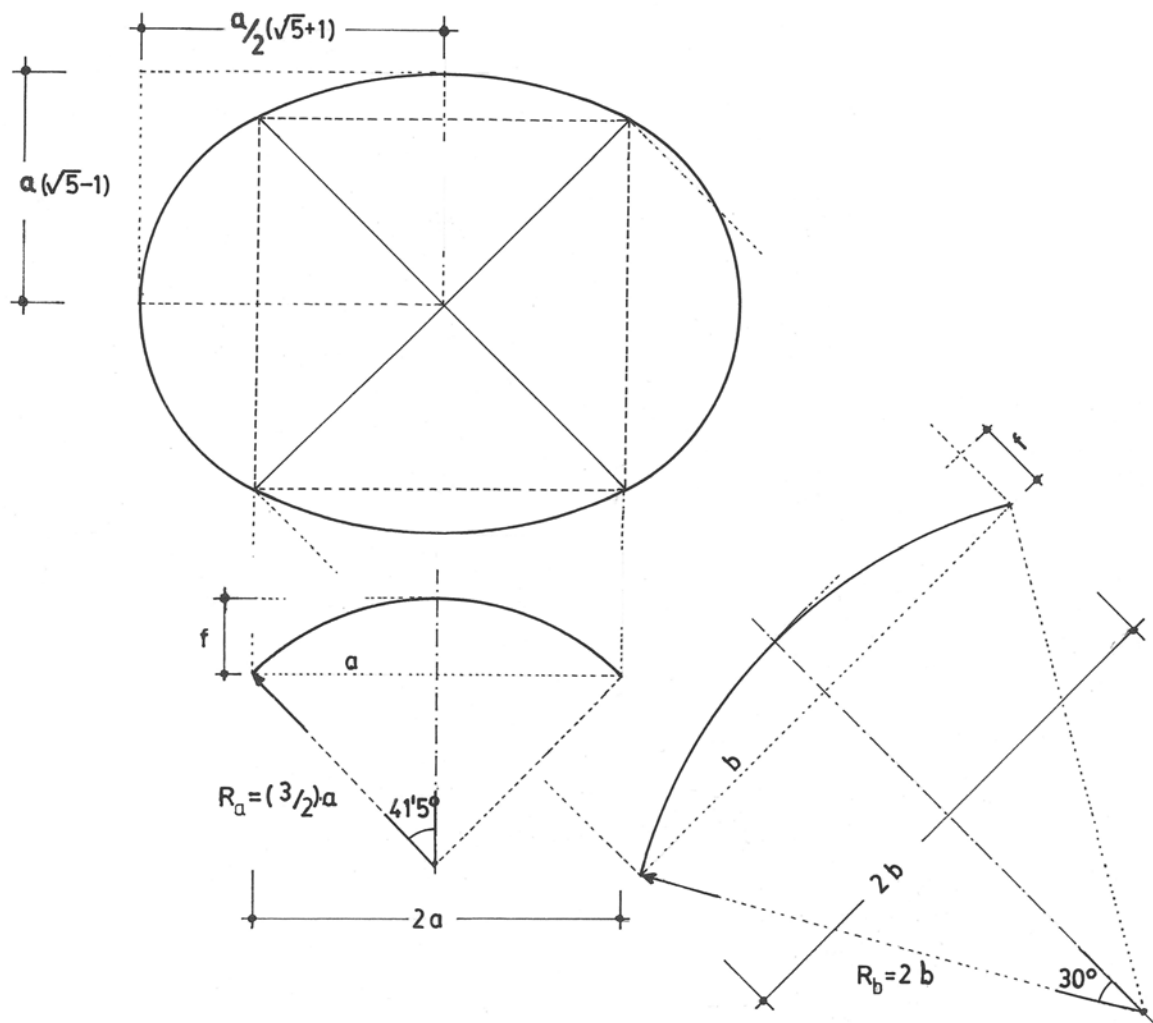
$$R_c = \frac{f^2 + a^2}{2f}$$

Realizados los cálculos, se llega a una medida que conduce a una regla sencilla: el radio es, muy aproximadamente, 3/2 la semiluz,  $R_c = 4,23$  m (a comparar con el valor “exacto” de 4,26).

El proceso de proyecto de la bóveda es como sigue:

- 1) se dibuja un cuadrado inscrito en el óvalo
- 2) se define la forma de la arista, esto es de la cercha, que se empleará en la construcción.
- 3) se toma para la arista un arco de circunferencia del mismo radio que la longitud de la arista.
- 4) la luz del cañón es la proyección de la arista. Se toma como radio 3/2 de la semiluz.

Con este proceso queda definida de manera directa la forma de la bóveda. Todos los arcos son fáciles de trazar para sacar las plantillas de los arcos de camones que formarán las cerchas. La proporción del óvalo teórico coincide casi perfectamente con la medida.

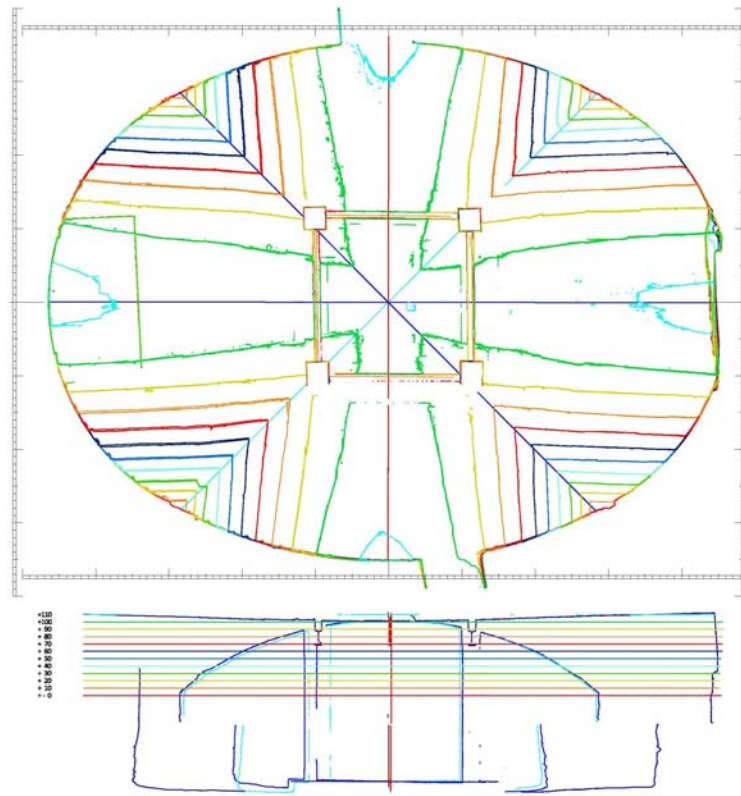


**Figura 5.** Trazo probable empleada en la construcción de la bóveda

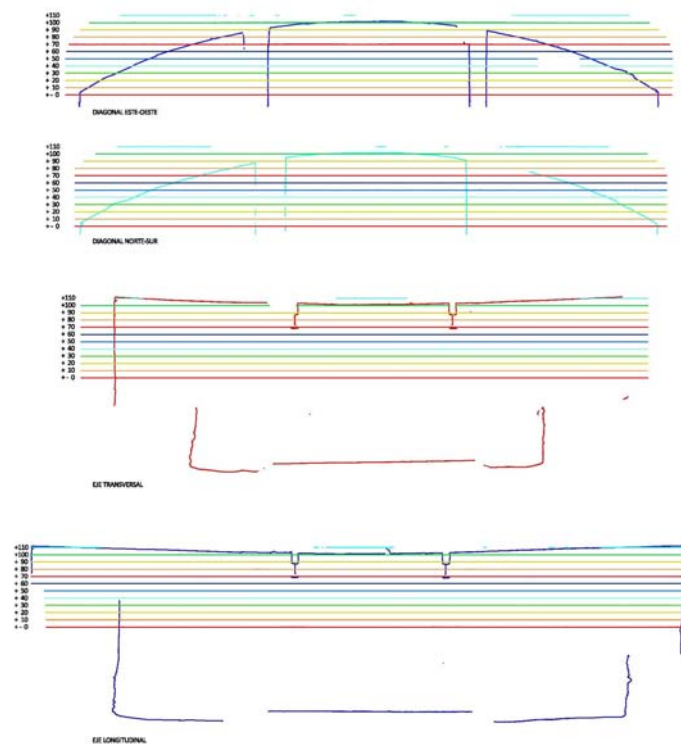
### 3.2 Levantamiento

El levantamiento se ha realizado con escáner láser por la empresa Mitra Restaura s.l. Las Figuras 6-9 recogen los aspectos principales. En particular, puede verse con claridad la deformación de la bóveda. La clave ha descendido unos 10 cm y esto conduce a una inclinación simétrica de las hiladas.

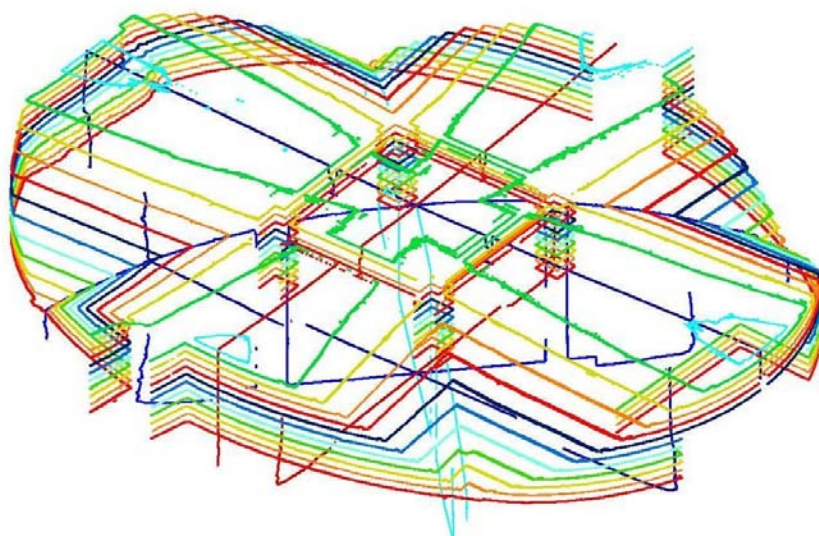
La inclinación no es uniforme: es menor en la zona fuera del cuadrado de la arista. Más adelante se discutirá el posible origen de esta deformación



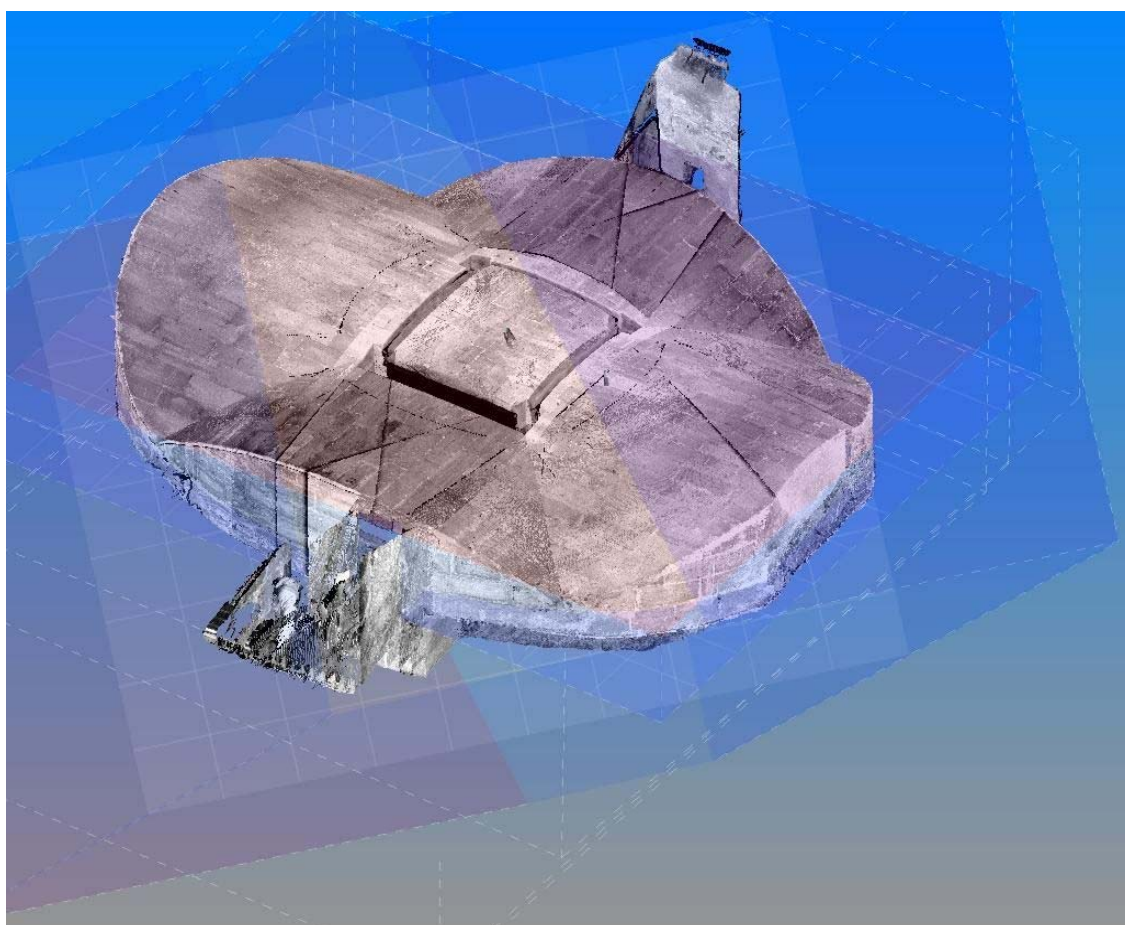
**Figura 6.** Planta, con indicación de las líneas de nivel, y sección de uno de los cañones (Mitra Restaura s.l.)



**Figura 7.** Secciones por las aristas y por los ejes principales (Mitra Restaura s.l.)



**Figura 8.** Perspectiva del levantamiento con las líneas de nivel (Mitra Restaura s.l.)



**Figura 9.** Perspectiva sólida del levantamiento (Mitra Restaura s.l.)

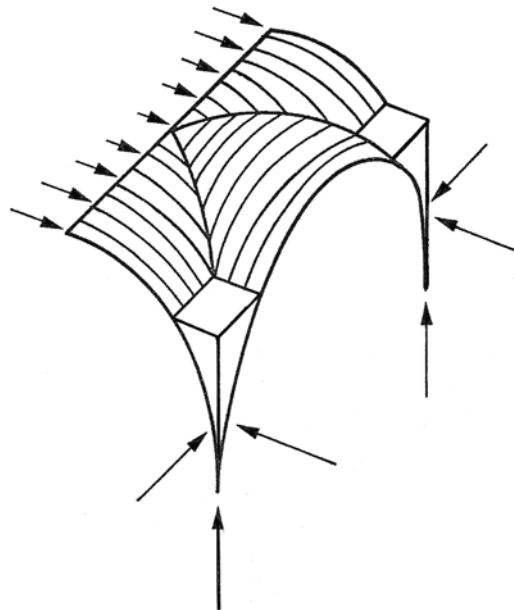
## 4. Análisis estructural

El análisis estructural permitirá entender el funcionamiento básico de la bóveda e interpretar la naturaleza y localización de los daños y agrietamientos.

### 4.1 Análisis de bóvedas de arista

El análisis riguroso de bóvedas de arista de fábrica ha sido desarrollado principalmente por Heyman (1977). No obstante, hay que decir que a finales del siglo XIX ya se realizaban análisis de equilibrio que son correctos dentro del actual marco del análisis límite (Huerta 2008).

Para el análisis se adopta el enfoque del equilibrio de Heyman (Huerta 2001), completamente rigurosos gracias al Teorema Fundamental de la Seguridad. Los cañones se imaginan divididos en arcos elementales: se calcula el empuje de cada uno de los arcos que constituye la acción sobre los arcos cruceros. En el caso de una serie de tramos iguales, por simetría, se puede cortar a su vez por la clave y establecer el equilibrio. Heyman ha demostrado que la resultante tiene que estar por encima del nivel de los arranques. Es preciso, entonces, que haya un relleno estructural de altura considerable (típicamente, entre  $1/2$  y  $2/3$  de la altura de la bóveda), Figura 10.

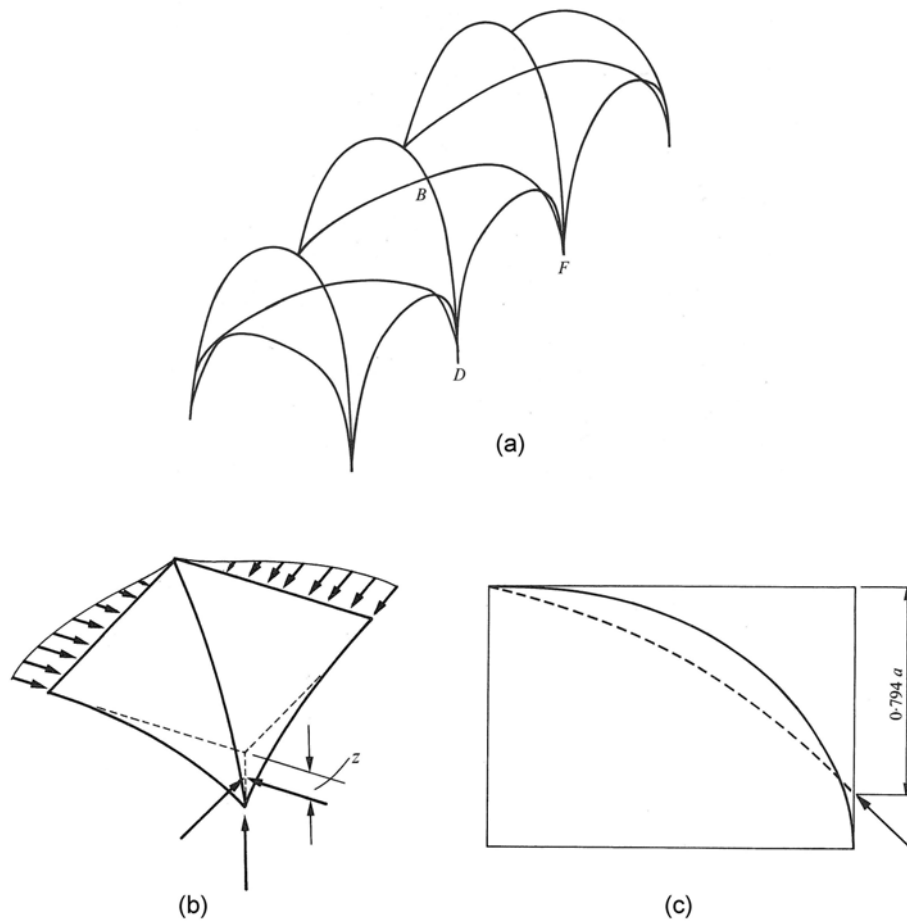


**Figura 10.** Equilibrio global de una serie de bóvedas arista (Heyman 1977, modificado añadiendo el relleno)

Heyman (1977) ha desarrollado la solución exacta (close solution) para el caso de una bóveda de arista cuadrada de cañones de sección semicircular con un espesor del 2% de la semiluz ( $1/25$  de la luz, que es un valor típico).



Entonces, se puede calcular el valor de la expresión del empuje mínimo y, haciendo el equilibrio (Fig. 11 (b) global, calcular la magnitud y posición del empuje en la arista.

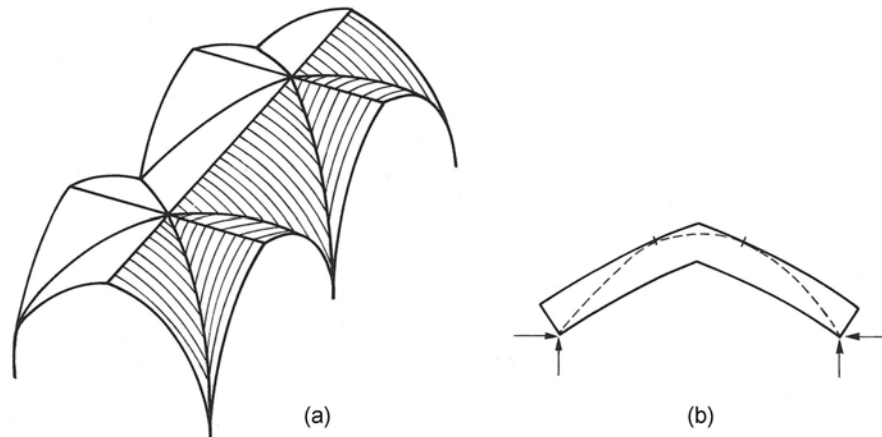


**Figura 11.** Análisis de una bóveda de arista de fábrica por el método de los cortes (Heyman 1977)

La línea de empujes se ha dibujado en Fig. 11 (c) y presenta una apreciable caída hacia abajo desde la clave. Este aspecto se comentará más adelante.

La obtención de soluciones exactas sólo es posible en casos teóricos. Para casos reales se puede aplicar el mismo método, dividiendo la bóveda en una serie de arcos discretos, y calculando el empuje mínimo para cada uno de ellos. Las reacciones de cada arco elemental serán las acciones sobre el arco de la arista, Figura 12.

Como se ha dicho, este método fue el empleado a finales del siglo XIX y principios del XX, de forma rutinaria, para calcular el empuje de las bóvedas de arista y crucería.



**Figura 12.** Método de los cortes para hallar una solución aproximada de equilibrio para una bóveda de arista o crucería (Heyman 1977)

#### 4.2 Análisis de la bóveda de la cripta

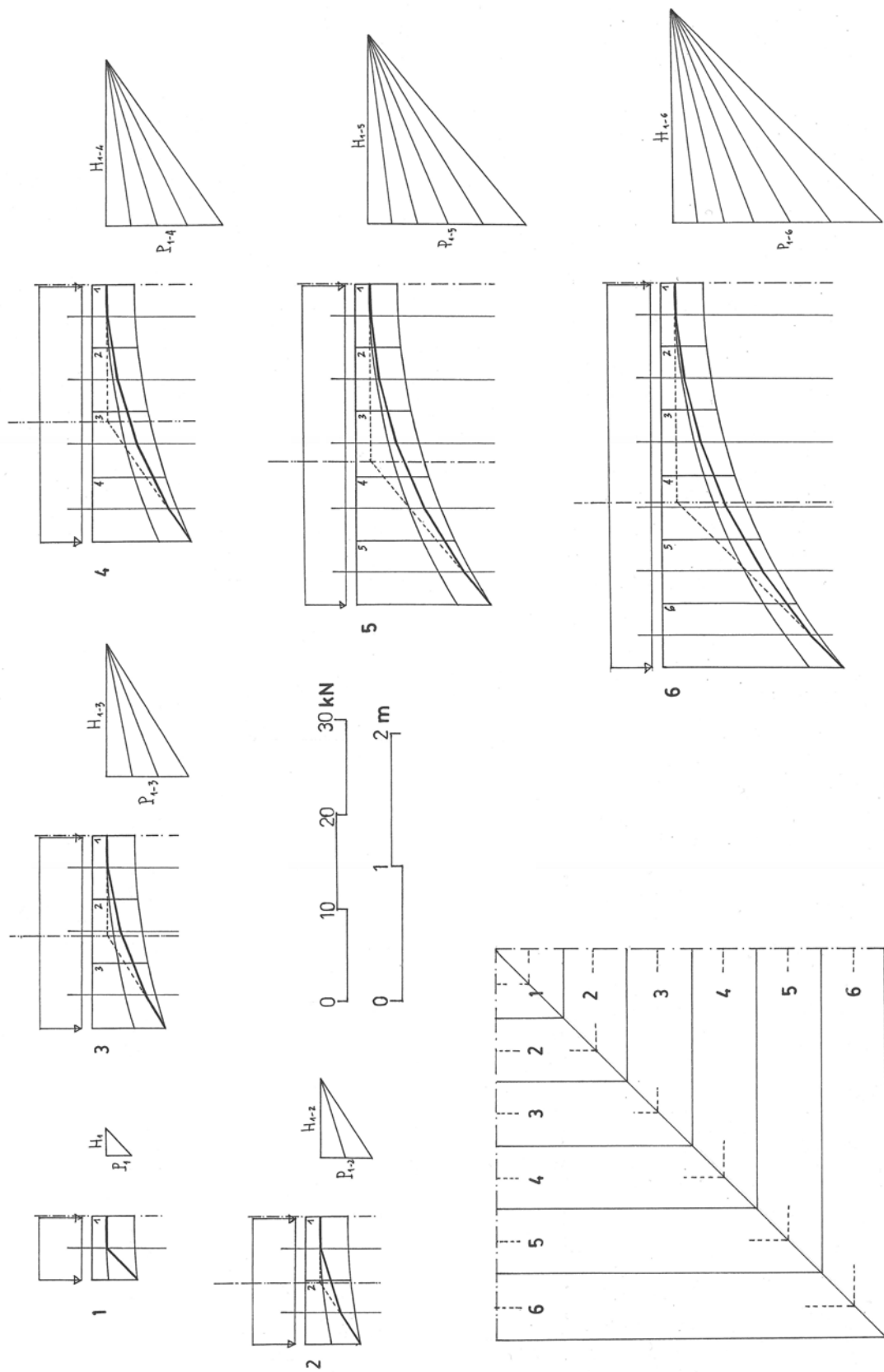
Para el análisis de la bóveda de la cripta se ha seguido este último método. Se ha centrado el análisis en la bóveda de arista. Dado que hay dos ejes de simetría, basta con analizar un cuarto de bóveda. Las cargas son el propio peso (se ha considerado un peso específico uniforme de  $17 \text{ kN/m}^3$ , un marés medio) y a una sobrecarga de  $4 \text{ kN/m}^2$  (uso público).

Cada medio cañón se ha dividido en seis arcos elementales, Figura 13 abajo izquierda. Para el análisis de cada arco elemental se ha considerado, a su vez, dividido en una serie de partes o segmentos, cortando por planos verticales. El arco 6, Figura 13, sirve de base al cálculo del resto, que se genera eliminando una parte cada vez. Los pesos calculados de los segmentos 1-6 se recogen en la siguiente Tabla 1.

Segmento	$P_{pi}$ (kN)	$P_{si}$ (kN)	$P_i$ (kN)
1	1,10	1,56	2,66
2	1,27	1,56	2,83
3	1,62	1,56	3,18
4	2,17	1,56	3,73
5	2,96	1,56	4,52
6	4,00	1,56	5,56

$$P_T = \sum P_i = 22,48$$

Las reacciones de cada uno de los segmentos se han obtenido gráficamente. Los resultados se han recogido en la Figura 13.



**Figura 13.** Análisis de los segmentos o arcos elementales

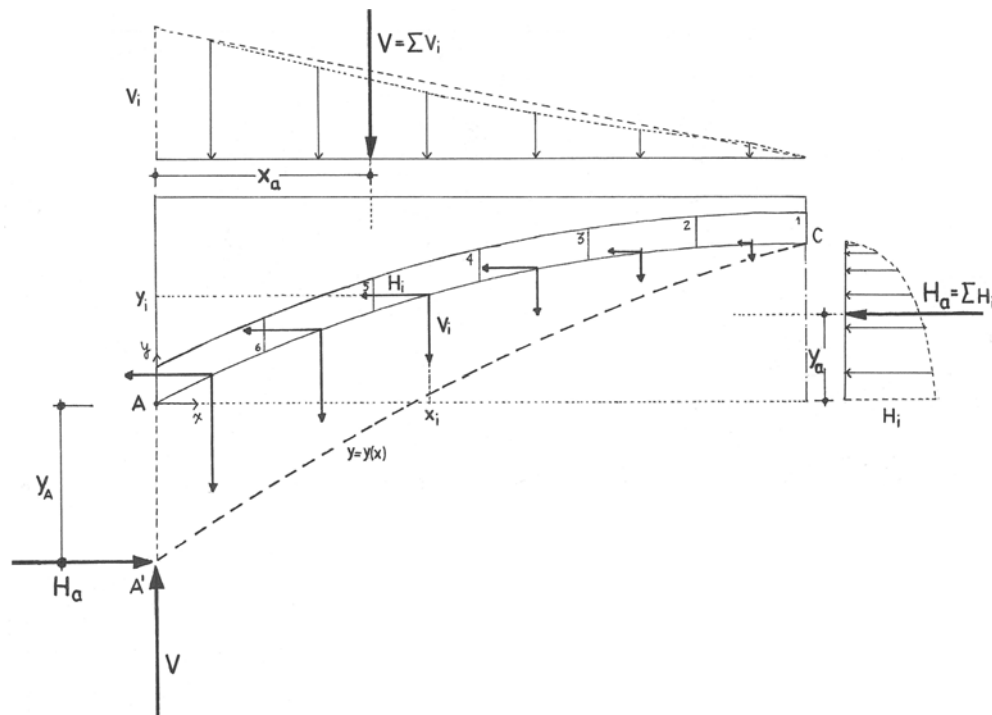
Las reacciones serán las acciones sobre la arista. Como sobre cada tramo de la arista actúan dos arcos elementales ortogonales entre sí. La componente vertical de la reacción será la suma de las componentes verticales y la horizontal resultará de su composición, esto es, será la del arco elemental por  $\sqrt{2}$ . En la Tabla 2 se recogen los valores de las reacciones de los arcos,  $P_i$ ,  $H_i$ , y de su composición,  $P_{ai}$  y  $H_{ai}$ .

Segmento	$P_i$ (kN)	$H_i$ (kN)	$P_{ai}$ (kN)	$H_{ai}$ (kN)
1	2,66	3,04	5,32	4,30
2	5,49	8,42	10,98	11,90
3	8,67	14,02	17,34	19,83
4	12,40	17,50	24,80	24,76
5	16,42	20,30	33,84	28,72
6	22,48	23,33	44,96	32,85

---

$\sum P_{ai} = 137,24 \quad \sum H_{ai} = 122,36$

En la Figura 14 se han representado las acciones sobre el arco de la arista y se ha realizado un análisis análogo al de Heyman de las Figuras 11 (b) y (c). Análogamente, la línea de empujes se separa inmediatamente del intradós del arco, alcanzando en los arranques un descuelgue  $y_A$  de, aproximadamente, 1 m. El cálculo de la línea de empujes debe realizarse, como aparece en la Fig. 11 (b), tomando momentos de para cada parte de bóveda.

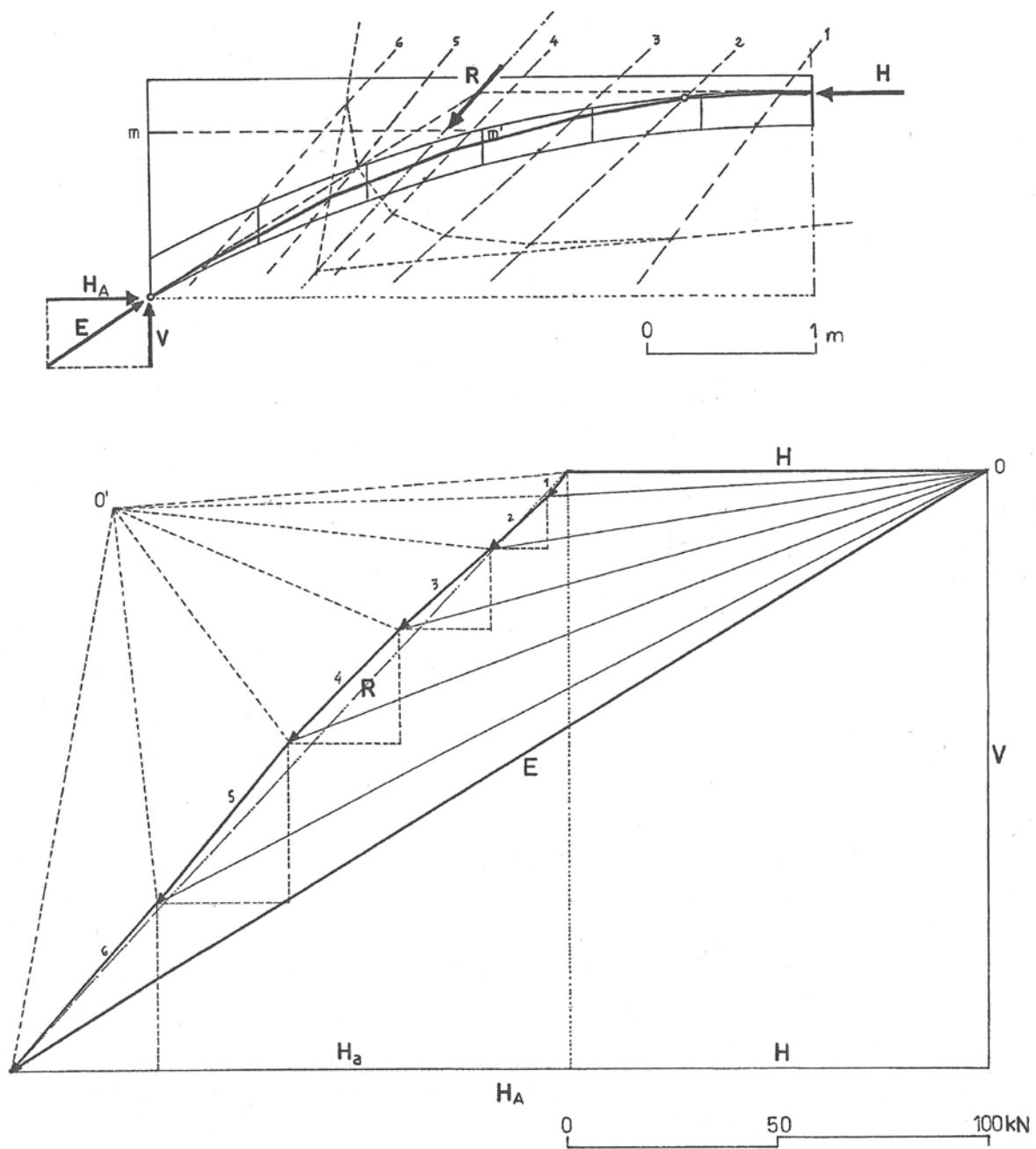


**Figura 14.** Línea de empujes para empuje nulo en la clave

El descuelgue en el arranque puede obtenerse directamente hallando las resultantes  $V$  y  $H_a$  de las fuerzas verticales y horizontales, y sus líneas de acción definidas por los parámetros  $x_a$ ,  $y_a$ .

La solución obtenida no es admisible pues la línea de empujes se sale inmediatamente de la fábrica. Para conseguir que entre dentro de la arista es preciso considerar que actúa un empuje horizontal  $H$  en el nervio de la arista.

Para calcularlo se ha realizado un análisis gráfico, recogido en la Figura 15.



**Figura 15.** Análisis gráfico de las fuerzas (empujes) en la arista

El método es en todo análogo al estándar para fuerzas verticales.

El polígono de fuerzas se obtiene disponiendo las fuerzas que actúan sobre la arista (de componentes  $P_{ai}$  y  $H_{ai}$ ) una a continuación de otras. Para hallar la resultante, resulta cómodo tomar un polo cualquiera  $O'$ , dibujar un polígono funicular y prolongar sus extremos. Este punto es un punto de paso de la resultante  $R$ .

A continuación se eligen dos puntos de paso para determinar la línea de empujes (el problema es indeterminado de tercer grado; la tercera condición es la simetría, que impone que el empuje en la clave  $H$  sea horizontal).

Para obtener el empuje mínimo se toma la parte superior de la clave y la inferior en el arranque. Trazando las rectas correspondientes se obtiene el polo  $O$  y ya se puede trazar la línea de empujes (equilibrio), que queda contenida por completo dentro de la fábrica (material).

Del análisis gráfico se deducen los siguientes valores de las fuerzas internas:

$$H = 97,40 \text{ kN}$$

$$V = 137,24 \text{ kN}$$

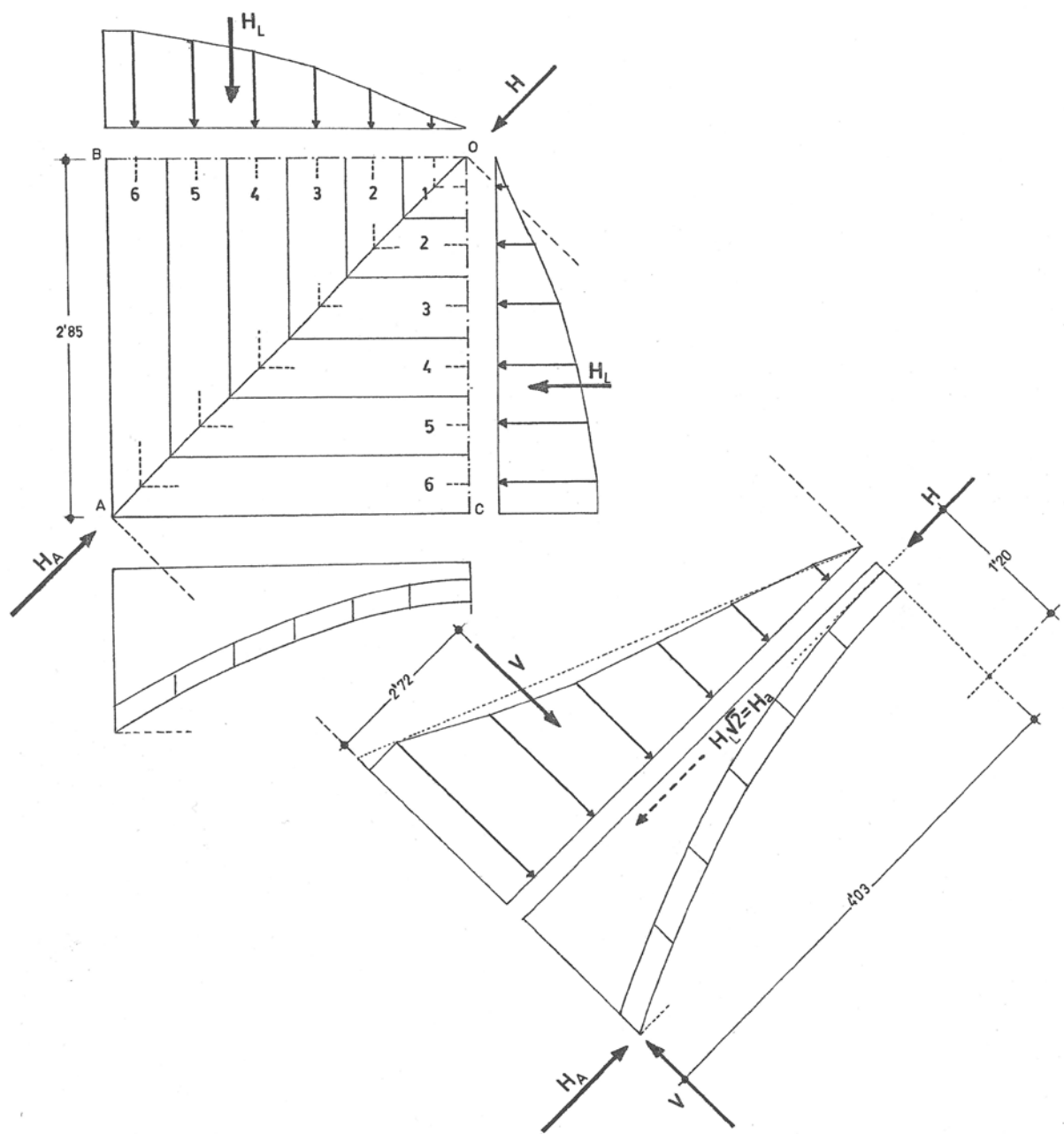
$$H_a = 122,36 \text{ kN}$$

$$H_A = H_a + H = 219,76 \text{ kN}$$

El peso total (incluyendo la sobrecarga de  $4 \text{ kN/m}^2$ ) de la bóveda de arista será, pues, de  $4 V = 558,96 \text{ kN}$  ó unas 56 toneladas. La superficie en planta es de  $5,65 \times 5,65 = 31,92 \text{ m}^2$  y la carga repercutida en planta será de  $558,96/31,92 = 17,5 \text{ kN/m}^2$ . Sin sobrecarga,  $13,5 \text{ kN/m}^2$ , equivalente a un espesor uniforme de marés (de  $17 \text{ kN/m}^3$ ) de  $13,5/17 = 0,79 \text{ m}$ .

Si se hubieran buscado directamente los valores de las fuerzas en los arranques, se podría haber realizado un análisis global, sin necesidad de dibujar la línea de empujes, análogo al realizado en la Figura 14.

Se ha realizado este análisis como alternativa y, también, para comprobar los resultados del análisis gráfico de la figura 15.



**Figura 16.** Análisis del equilibrio global de un cuarto de bóveda de arista

### 4.3 Niveles de tensiones

El análisis gráfico demuestra la estabilidad de la bóveda. Queda verificar que los niveles de tensiones son lo suficientemente bajos para que no se produzca el fallo del material.

Las tensiones máximas se producirán, en la hipótesis extraordinariamente conservadora de que todas las cargas se transmiten por la arista, en los arranques. No obstante, al realizar la cata se comprobó que existe un buen relleno de marés hasta el nivel *m-m'* (Fig. 15). Así, el punto más crítico corresponderá a la sección 3, donde la fuerza que actúa es de 142 kN (obtenida midiendo a escala en el dibujo).

La bóveda tiene un espesor de 200 mm. Si consideramos que “se forma” un nervio cuadrado en la intersección de los dos cañones, la tensión media valdría:  $142.000 / (200)^2 = 3,55 \text{ N/mm}^2$ . Por supuesto, considerar un nervio aislado de estas dimensiones es extraordinariamente conservador y, probablemente, la tensión será de la mitad o menos, esto es, de unos 1-2  $\text{N/mm}^2$  (bastaría con considerar un área doble).

No hay datos fiables de la resistencia del marés. Según Sánchez-Cuenca un marés medio tiene una tensión de rotura de entre 5 y 10  $\text{N/mm}^2$ , pero también da para mareses duros entre 10 y 20  $\text{N/mm}^2$ , alcanzando los muy duros los 60  $\text{N/mm}^2$ . A esta dispersión hay que añadir las variaciones de resistencia debidas a la humedad.

El valor calculado de 1-2  $\text{N/mm}^2$  (en cualquier caso muy por encima de la tensión media en los cañones de, aproximadamente,  $\gamma R = (17 \text{ kN/m}^3) (4,25 \text{ m}) = 72,25 \text{ kN/m}^2 = 0,072 \text{ N/mm}^2$ , más de un orden magnitud por debajo) parece, pues, razonablemente seguro y habría que buscar el origen de los daños locales en otra causa.

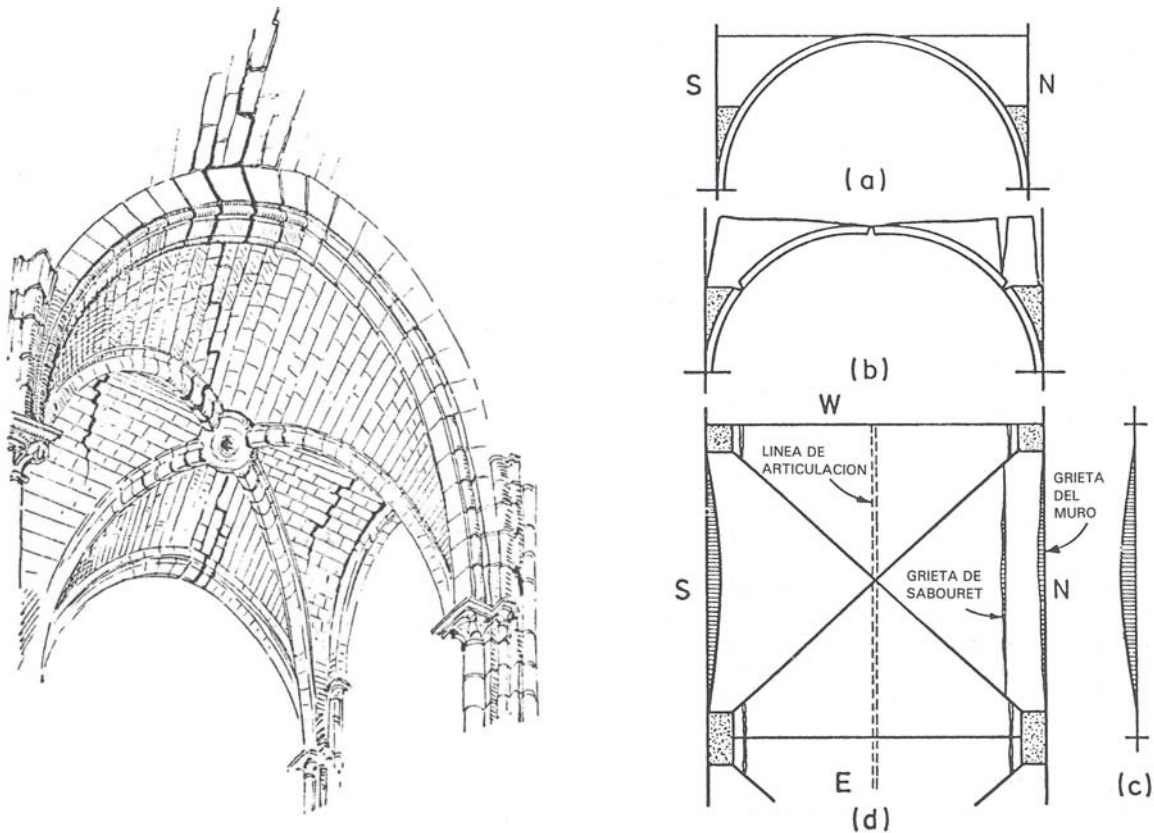
### 4.4 Origen de los agrietamientos y daños

Las grietas de las bóvedas de fábrica son casi siempre consecuencia de ligeros cedimientos del sistema de contrarresto. El estudio riguroso de las grietas dentro del marco del moderno análisis límite se debe a Heyman.

Las grietas típicas de una bóveda de arista o crucería, de una nave gótica, se recogen en el esquema dibujado por Abraham (1934) y fue interpretado por primera vez correctamente por Heyman (1983), Figura 17. El cedimiento hacia fuera produce un agrietamiento típico en el cañón en el sentido de la nave (una grieta en la clave, dos en los riñones) y el consiguiente descenso de la línea de clave. El cañón transversal debe “partirse” para acompañar el movimiento, produciéndose las grietas de Sabouret y del muro (Fig. 17). Por supuesto, estos



agrietamientos no afectan a la estabilidad; es más, es precisamente la capacidad de agrietarse lo que confiere “plasticidad” a las fábricas.



**Figura 17.** Agrietamientos típicos de un bóveda de crucería o arista por un ligero cedimiento del sistema de contrarresto. Izquierda, Abraham (1934); derecha, Heyman (1983)

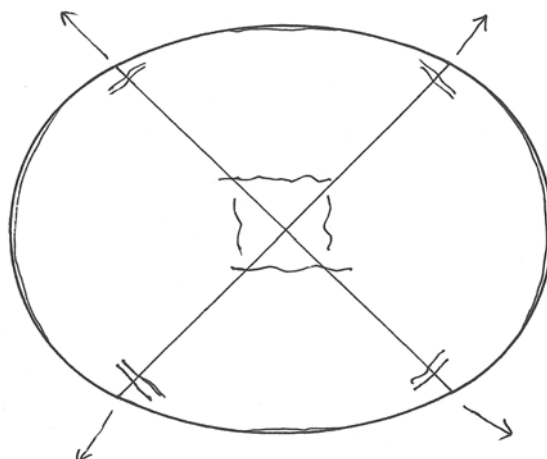
El caso de la bóveda de la cripta es distinto. El cedimiento se dirigirá en una cierta dirección, debido al empuje concentrado en las aristas. Sin embargo, la forma del muro perimetral hace difícil conocer exactamente esta dirección.

Por otra parte, la baja altura del muro impide realizar mediciones precisas de desplomes.

Ya se ha dicho que, según el levantamiento realizado, el cuadrado no se ha distorsionado. Sin embargo, hay que hacer notar que la precisión de 1-3 cm es del mismo orden que los movimientos que explicarían un descenso de 10 cm.

Para bóvedas rebajadas, la relación entre apertura y descenso es, aproximadamente igual a la relación entre semiluz y flecha. En este caso, la relación semiluz/flecha = 4, indica que una apertura en el sentido de las diagonales de 2 cm (1/400 de su longitud!), llevaría a un descenso de 8 cm.

El modelo de agrietamiento “teórico” llevaría a unas grietas, hacia abajo, en la zona de la clave, y a cuatro grietas abiertas hacia el relleno en el arranque de las aristas. En los bordes habría una separación ligera del casco de la bóveda del muro. De forma muy esquemática se ha recogido este modelo de agrietamiento en el croquis de la Figura 18.



**Figura 18.** Esquema de agrietamiento “teórico” de la bóveda de la cripta por un ligero cedimiento aproximadamente radial de los apoyos

Los agrietamientos observados coinciden con el esquema general propuesto. Las grietas de articulación en los arranques se producirían, teóricamente, sobre el vivo de las aristas, conduciendo a altas concentraciones de tensión. Es ahí donde se observan desconchones y agrietamientos locales. Estas grietas sólo aumentan la superficie de apoyo y no afectan la estabilidad.

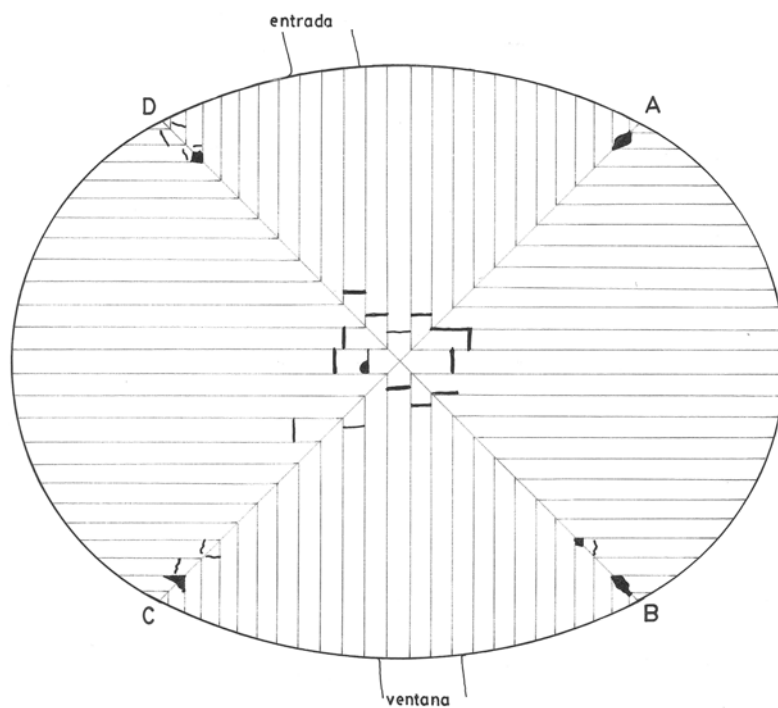
En la zona de clave se aprecian unos agrietamientos que denotan zonas de articulación.

Finalmente, en el extremo derecho (según se entra) del eje mayor se ha podido apreciar la separación (luego rellenada) del casco respecto al muro.

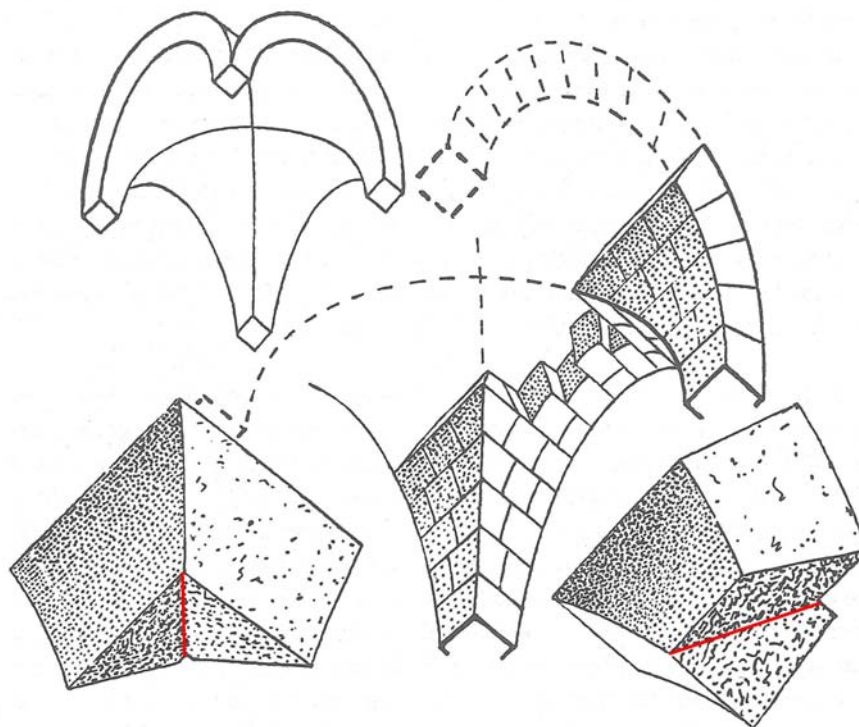
En la Figura 19 se han representado los agrietamientos y fracturas, que pueden verse en las fotos de las láminas.

Los desconchones y fracturas de las aristas son especialmente llamativos. Como se ha dicho no revisten importancia. Resultaría interesante intentar explicar la relación entre las fracturas y la forma del corte de la piedra en las aristas. Este tema se sale del ámbito del presente informe, pero merece la pena reseñarlo.

En efecto, como puede verse en el dibujo de la Figura 20, el corte de la piedra obliga a realizar ángulos vivos que sin duda han facilitado la formación de las superficies de fractura.

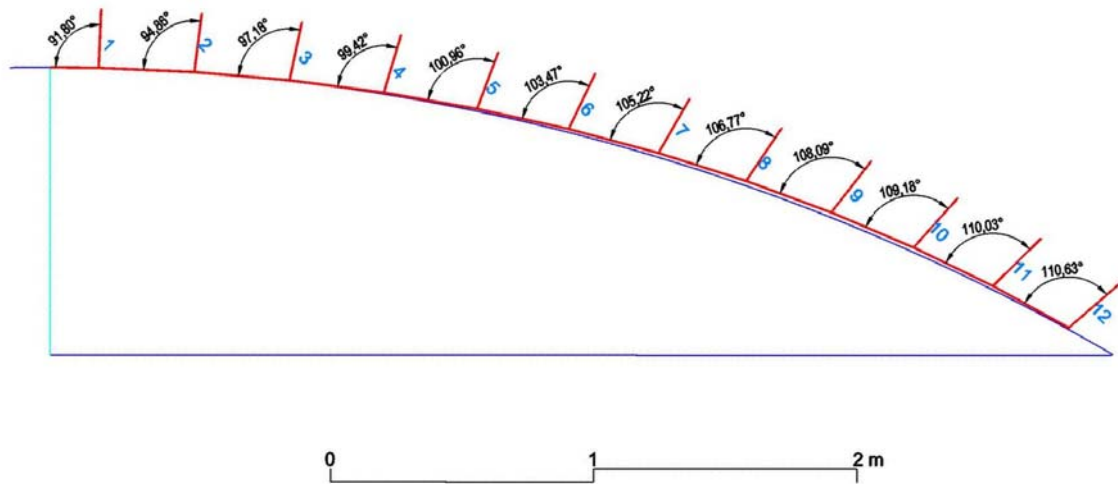


**Figura 19.** Levantamiento de agrietamientos y daños



**Figura 20.** Corte de la piedra en la arista (Fitchen 1961)

Se ha hecho una última comprobación geométrica para ver la posible formación de planos de rotura. Se ha calculado la inclinación de la arista entrante (marcada en rojo en la Fig. 20) para comprobar que no habría problemas de deslizamiento según ese plano. En efecto, la inclinación del vivo de la arista no reviste problemas, Figura 21. Por otra parte las hiladas impedirían el posible deslizamiento. Como se ha dicho es un problema teórico interesante.



**Figura 21.** Inclinación de la arista entrante en el plano diagonal

## 5. Conclusiones

- 1) La bóveda de la cripta bajo la sala capitular de la catedral de Palma de Mallorca es una bóveda de arista de sillería de marés, muy bien proyectada y construida, con arreglo a las mejores normas de la construcción de fábrica.
- 2) El análisis de estabilidad demuestra, como no podía ser de otra manera en una bóveda que llevaba en pie (sin apeo) varios siglos, que la bóveda posee una gran estabilidad, incluso para las nuevas sobrecargas de uso público.
- 3) Las grietas y daños son enteramente normales en este tipo de bóvedas y no revisten el menor peligro para su estabilidad. Se deben a un ligerísimo cedimiento de los apoyos y, muy posiblemente, a un descenso notable de la resistencia del marés por la humedad debida a una deficiente ventilación.
- 4) La deformación visible del suelo obedece a ambas causas y es normal en bóvedas muy rebajadas, como es el caso. No reviste ninguna importancia estructural. Si se quisiera nivelar el suelo, bastaría con levantar el enlosado y extender un relleno de nivelación, para posteriormente volver a colocar las losas.
- 5) El apeo se colocó en fecha desconocida, posiblemente en los años 1950 ó 1960, como una medida de precaución que se ha demostrado innecesaria. No obstante, se colocó con cuidado y esto ha permitido su retirada sin dejar apenas huella en el intradós.

### RECOMENDACIONES:

- 6) Ventilar la cripta con ventilación cruzada, liberando la ventana y disponiendo una trampilla con una amplia rejilla de ventilación (lo ideal sería que ocupara toda la superficie de la trampilla).
- 7) No disponer grandes pesos en el centro de la sala capitular (esculturas etc.) sin realizar antes un cálculo de la viabilidad.

Todo lo cual afirmo y rubrico según mi leal saber y entender en Madrid, a 6 de mayo de 2013.



Firmado:

Santiago Huerta Fernández

Profesor Titular del Departamento de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid

## 6. Bibliografía

- Abraham, P. 1934. *Viollet-le-Duc et le rationalisme médiéval*. Paris: Vicent, Fréal et Cie.
- Fitchen, J. 1981 (1a. Ed. 1961). *The construction of Gothic Cathedrals: A Study of Medieval Vault Erection..* Chicago: The University of Chicago Press.
- Garcia Inyesta, N. y G. Oliver Sunyer. 1997. *Construir en Marès*. Palma de Mallorca: Delegació Mallorca del Col.legi Oficial d'Arquitectes de Balears.
- Heyman, J. 1977. *Equilibrium of Shell Structures*. Oxford: Clarendon Press.
- Heyman, J. 1983. Chronic Defects in Masonry Vaults: Sabouret's Cracks. *Monumentum*. Vol. 26: pp. 131-141.
- Heyman, J. 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Colección de ensayos*. Editado por S. Huerta. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Heyman, J. 1999. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera / CEHOPU.
- Heyman, J. 2011. *Teoría básica de estructuras*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Huerta, S. 2001. «Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach» *Historical Constructions. Possibilities of numerical and experimental techniques. Proceedings of the 3rd. International Seminar. Guimaraes 7-9, November*, P. B. Lourenço and P. Roca, eds. Guimaraes: Universidade do Minho, pp. 47-69.
- Huerta, S. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Huerta, S. 2007. Oval Domes: History, Geometry and Mechanics. *Nexus Network Journal. Architecture and Mathematics*. Vol. 9: pp. 211-248.
- Huerta, S. 2008. The Analysis of Masonry Architecture: A Historical Approach. *Architectural Science Review*. Vol. 51, n°4: pp. 297-328.
- Sánchez-Cuenca, R. 2010, *El marès. El material, su origen, historia, propiedades, canteras y calidades disponibles actualmente*. Palma de Mallorca: Ramón Sánchez-Cuenca.

## 7. Láminas





1



2

Relleno estructural del trasdós de la bóveda





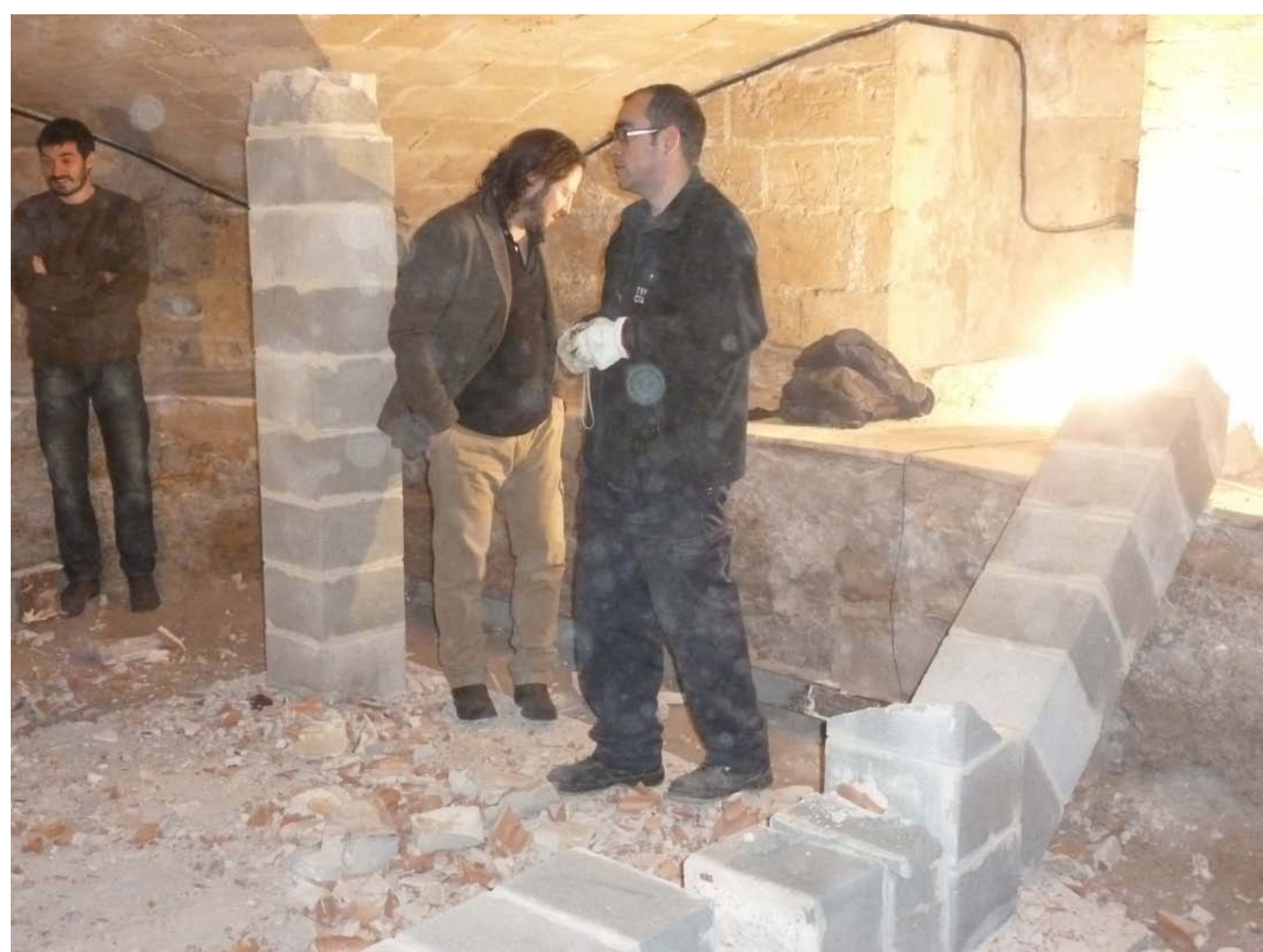
3



4

Apeo existente





5-10

Desmontaje del apeo





11



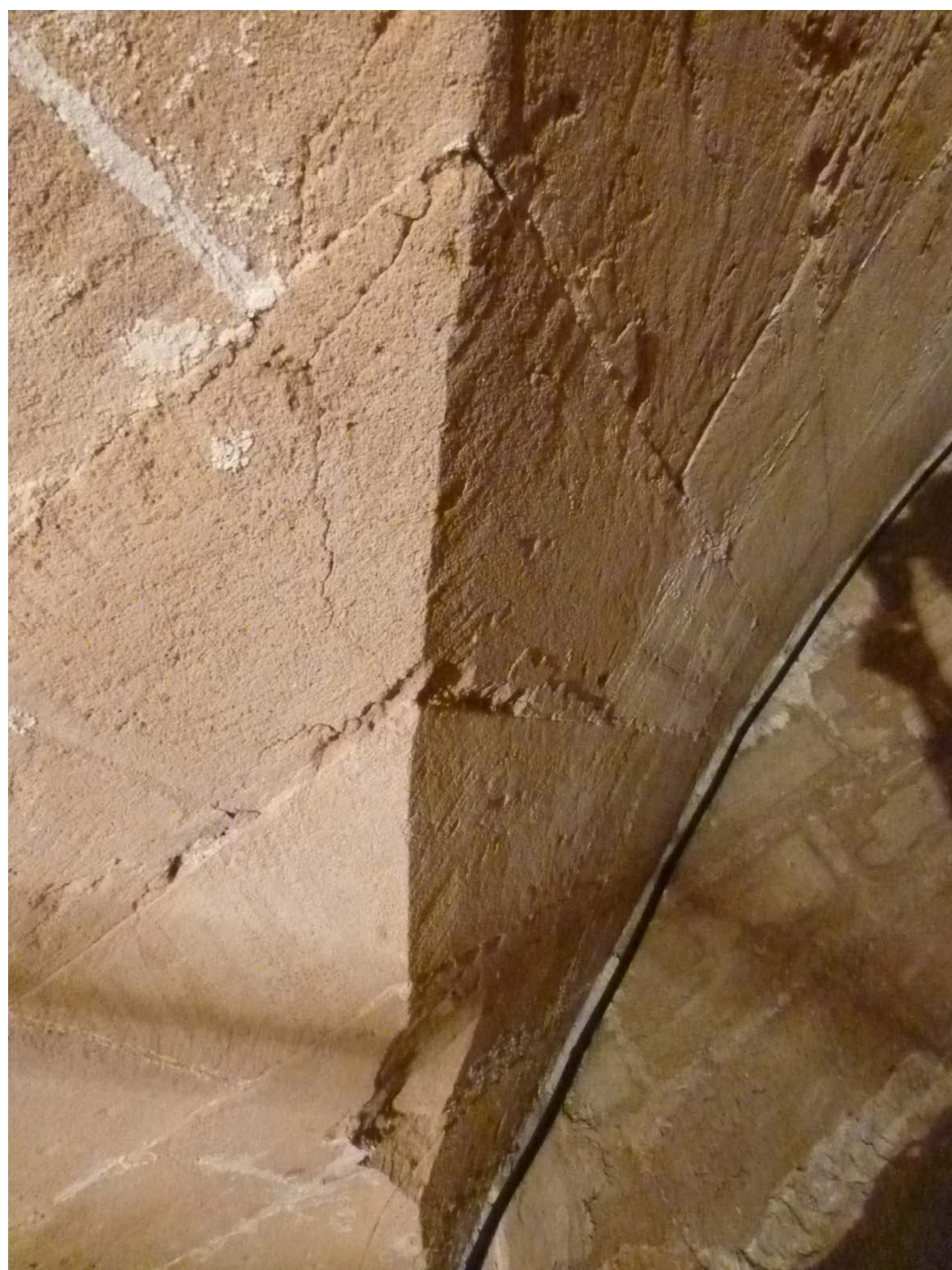
12

Desmontaje del apeo





13



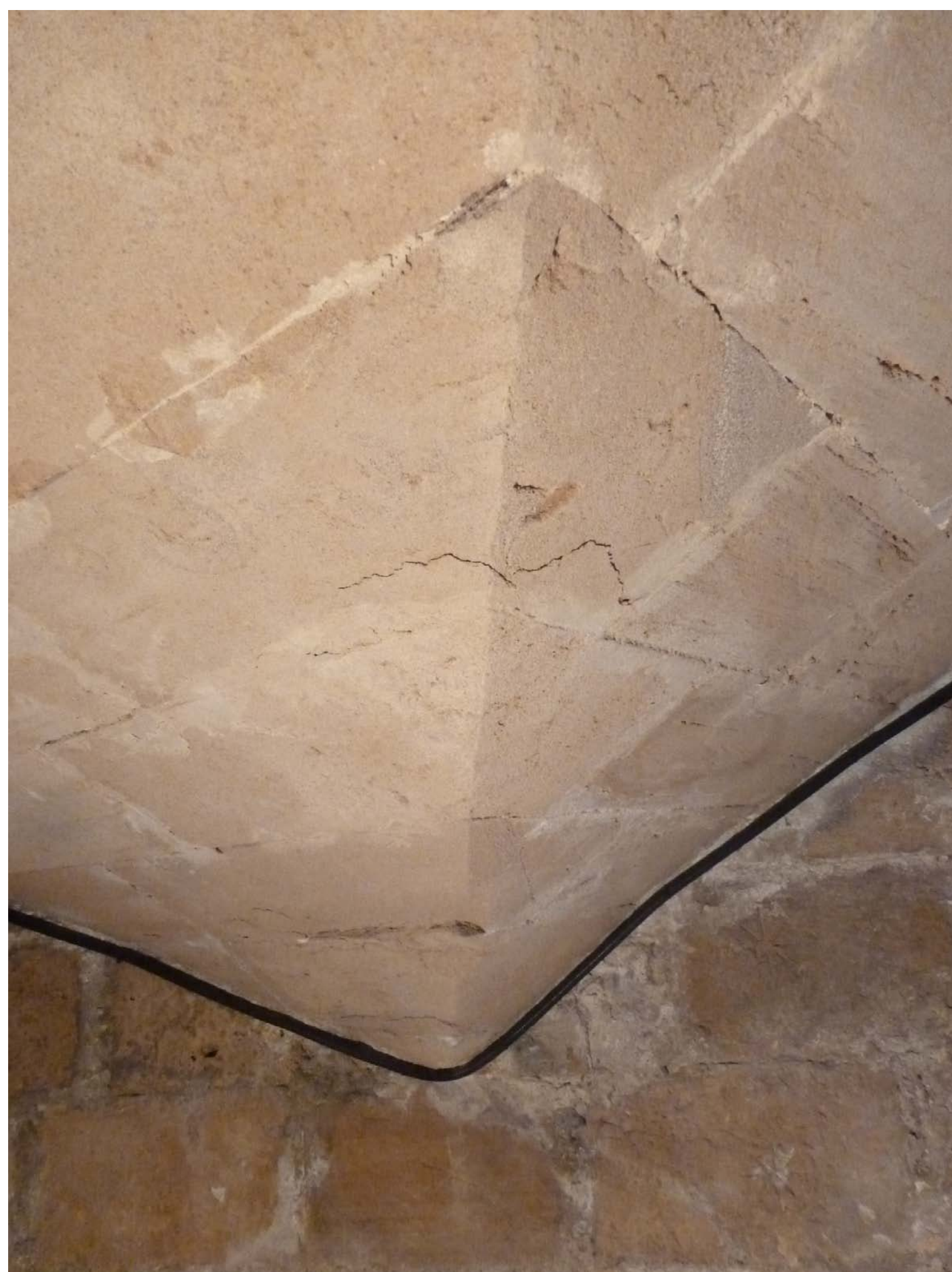
14

Arista A





15



16

Arista B





Arista C





17



18

Arista D





19



20

Agrietamientos en la zona de la clave





21



22

Grieta de separación (rellena) entre el casco y el muro